

ВИМІРЮВАННЯ ККД ВОДОГРІЙНОГО КОТЛОАГРЕГАТА НА ГАЗОВОМУ ПАЛИВІ У МАСШТАБІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

© Тарас Б.І., 2010

Поставлено задачу вимірювання ККД водогрійного котлоагрегата з перспективою застосування екстремального керування співвідношенням паливо-повітря за цим критерієм. Запропоновано та проаналізовано структурну схему вимірювання ККД на основі вимірювання витрати природного газу та теплової енергії, що передається теплоносію.

In this paper, a task measuring the efficiency of boiler with the prospect of extreme control fuel-air ratio for this criterion. Proposed and analyzed the structural scheme of measuring efficiency by measuring the consumption of natural gas and heat energy that is transferred to the coolant.

Постановка проблеми. Основним критерієм ефективності роботи котлоагрегата є його коефіцієнт корисної дії (ККД). Відомі й основні шляхи підвищення ККД [1]:

- зниження втрат тепла з відхідними газами збільшенням площі нагрівання, яка визначається під час проектування котла на основі техніко-економічних розрахунків;
- зниження втрат тепла за рахунок зовнішнього охолодження підвищенням теплоізоляції зовнішніх поверхонь топки, газоходів, колекторів екранів і економайзерів, трубопроводів і повітропроводів;
- зниження втрат тепла, пов'язаних з "підсмоктуванням" холодного повітря, покращанням герметичності трактів котла;
- зниження втрат за рахунок механічної неповноти згоряння палива покращанням аеродинамічних характеристик котла, застосування сучасних пальників тощо;
- підвищення хімічної повноти згоряння палива відповідно до регулювання співвідношення паливо/повітря.

Варто відзначити, що із названих вище, саме останній напрямок являє інтерес під час розробки систем автоматичного керування котлами, оскільки він уможливує підвищити ККД котла, не вносячи змін у його конструкцію безпосередньо, а лише за рахунок модернізації технічних засобів автоматизації та зміни алгоритмів керування ним.

Втрати тепла від хімічної неповноти згоряння газового палива (природного газу) виникають в зв'язку з тим, що для забезпечення його повного згоряння, повітря в топку котла подається з надлишком, що зумовлено неможливістю повного змішування палива з повітрям. Надлишок повітря характеризує коефіцієнт надлишку повітря α , який дорівнює відношенню дійсної кількості повітря, що подається в топку, до теоретично необхідної, і для котлів на газовому паливі становить $1...1,1$. За недостатнього надлишку повітря утворюються продукти неповного згоряння палива, такі як чадний газ CO і водень H_2 , а у відхідних газах може з'явитися і метан CH_4 , для згоряння якого не вистачило кисню (повітря). А у разі надто великого надлишку повітря відбувається вищезгадане "видування тепла з топки", – тобто непотрібне нагрівання цього надлишкового повітря, а відповідно і атмосфери.

Аналіз останніх досліджень. Сьогодні регулювання співвідношення газ/повітря здійснюється на основі аналізу хімічного складу відхідних газів. Наявність чадного газу (CO) у відхідних газах свідчить про неповноту згоряння (замалий коефіцієнт надлишку повітря), а наявність кисню

(O₂) – про надлишок повітря в топці. Для цього під час налагодження контуру регулювання співвідношення газ/повітря вимірюють вміст кисню і чадного газу для заданих певних навантажень котла (наприклад, 25, 50, 75, 100 % від номінальної потужності). Для кожного із цих режимів, домагаючись найнижчої концентрації кисню та відсутності чадного газу у відхідних газах встановлюють оптимальне співвідношення газ/повітря. На основі отриманих значень знаходять інтерполяванням значення оптимального співвідношення газ/повітря і для проміжних навантажень. Отримані значення співвідношень газ/повітря для певного навантаження котла вносять в алгоритм керування котлом. Однак реалізувати керування співвідношенням газ/повітря на основі безперервного вимірювання складу відхідних газів внаслідок ненадійної роботи газоаналізаторів, значного часу запізнення в їх вимірювальних каналах та проблем з відбором газових проб для аналізу сьогодні порівняно складно.

До недоліків цього підходу щодо керування процесом горіння в котлоагрегатах також варто зарахувати таке:

1. Цей метод не є універсальний для усіх котлів водогрійного типу середньої потужності і вимагає "індивідуального" підходу до кожного конкретного котлоагрегата.
2. Налаштування здійснюється за певного складу природного газу, і у разі зміни хімічного складу природного газу встановлені налаштування перестають бути оптимальними.
3. Налаштування здійснюється за певної температури довкілля, а отже, й за певної температури природного газу, які в процесі експлуатації котла змінюються, вносячи додаткові відхилення від оптимального коефіцієнта надлишку повітря.
4. Успішність якісного налаштування процесу горіння значною мірою залежить від кваліфікованості та досвідченості інженера-налагоджувальника.
5. Існує похибка оптимального співвідношення газ/повітря у проміжних точках, пов'язана з методикою їх розрахунку.
6. Навіть у разі найкращого налагодження процесу горіння підібране співвідношення газ/повітря через певний термін експлуатації котлоагрегата не буде оптимальним, оскільки відбуваються зношуваність та старіння деталей котлоагрегата, утворення нагару на пальниках, погіршення теплопередачі тепла теплоносію тощо. Тому виникає необхідність повторного переналагоджування котлоагрегата (як правило, під час профілактичних робіт).

Цілі статті. У зв'язку з цим ми запропонували реалізувати систему екстремального керування співвідношенням газ/повітря за критерієм ККД, де як цільова функція буде ККД котлоагрегата, який весь час буде підтримуватися на максимумі, а змінюваним параметром – співвідношення газ/повітря.

Для реалізації такої системи екстремального керування необхідно розробити систему реального часу для безперервного вимірювання ККД котлоагрегата.

Аналіз технологічного процесу. Загалом рівняння теплового балансу котлоагрегата в усталеному режимі роботи записується у вигляді [1]:

$$Q_o^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (1)$$

де Q_o^p – доступне тепло на 1 м³ палива (природного газу), Дж/м³; Q_1 – корисно використане тепло, що витрачається на підігрівання теплоносія (для водогрійних котлів – води), Дж/м³; Q_2 – втрати тепла з відхідними газами, Дж/м³; Q_3 – втрати тепла від хімічної неповноти згоряння палива, Дж/м³; Q_4 – втрати тепла від механічної неповноти згоряння палива, Дж/м³; Q_5 – втрати тепла від зовнішнього охолодження котлоагрегата, Дж/м³.

Отже, ККД котлоагрегата визначатиметься відношенням:

$$\eta_{к.а.} = \frac{Q_1}{Q_o^p} \quad (2)$$

Для вимірювання ККД необхідно вимірювати кількість доступного тепла від згорання 1 м^3 газу і корисне тепло, витрачене на підігрівання теплоносія. Вимірювання доступного тепла полягає у вимірюванні об'єму газу, що поступає у топку котла, і у визначенні його теплотвірної здатності. Вимірювання ж корисного тепла полягає у вимірюванні об'єму теплоносія, що проходить через котел, та різниці температур на вході та на виході з котла. В такий спосіб система вимірювання ККД котлоагрегата матиме таку функціональну схему (рис. 2).

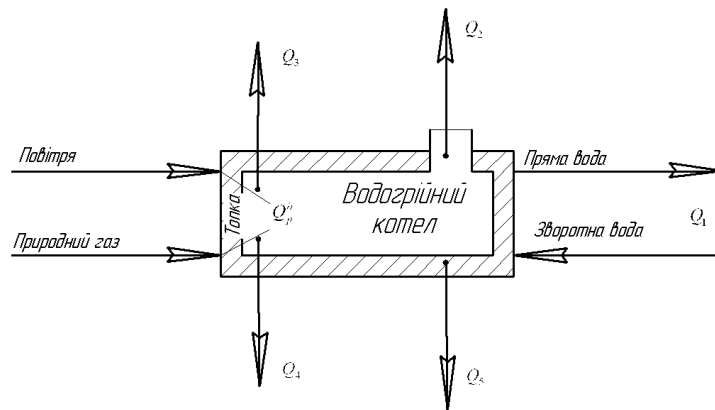


Рис. 1. Тепловий баланс водогрійного котла в усталеному режимі

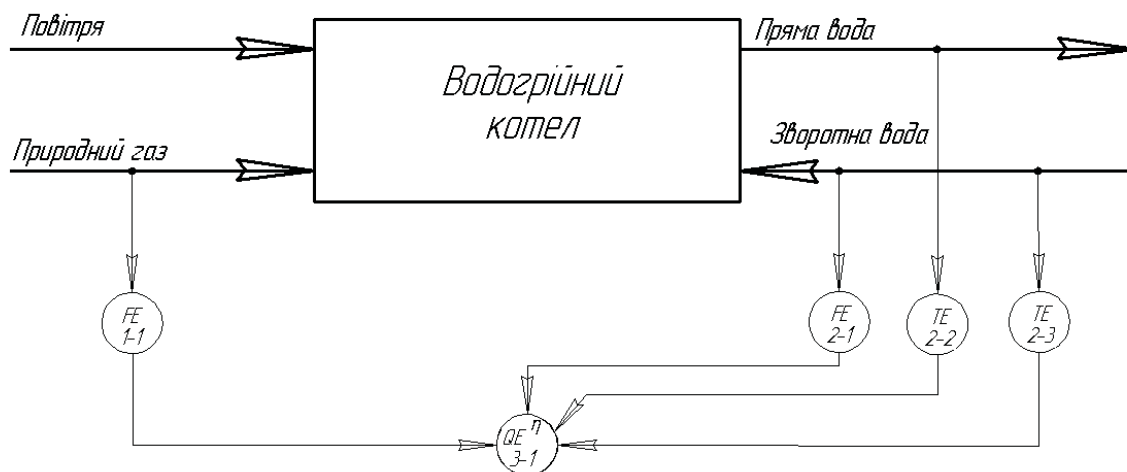


Рис. 2. Функціональна схема вимірювання ККД котлоагрегата водогрійного типу на газовому паливі:

FE1-1 – вимірювальний перетворювач витрати природного газу;

FE2-1 – вимірювальний перетворювач витрати теплоносія; TE2-2 – вимірювальний перетворювач температури прямої води; TE2-3 – вимірювальний перетворювач температури зворотної води;

QE3-1 – обчислювальний пристрій ККД

Визначення теплотвірної здатності природного газу регламентується в [2]. Аналіз складу природного газу здійснюється в хімічних лабораторіях і його теплотвірна здатність є відомою і істотно не змінюється з часом, тому її можна вважати сталою величиною, передбачивши можливість введення цього значення в обчислювальний пристрій. Загалом теплотвірна здатність газового палива не впливатиме на якість роботи контуру регулювання співвідношення паливо/повітря, оскільки в ньому використовуватимуться принципи екстремального керування. Інформація ж про склад палива буде необхідна для визначення початкового співвідношення паливо/повітря.

Для вимірювання температур прямої і зворотної води можна скористатися стандартними вимірювальними перетворювачами температури. Обчислення теплової енергії регламентується в [3].

Для вимірювання витрат природного газу і теплоносія доцільно скористатися вимірюванням витрат рідин і газів методом змінного перепаду тисків [4].

Динаміка процесу. Вищеописані процеси стосувалися усталеного режиму роботи котлоагрегата, тобто за постійної витрати палива та незмінного теплового навантаження котла. У випадку ж зміни хоча б одного з вищеперерахованих чинників зміниться температура теплоносія і обчислювальний пристрій повинен наново розрахувати ККД котла, враховуючи інерційність самого котлоагрегата, а також інерційність вимірювальних перетворювачів.

Теоретичний розрахунок динаміки котла по каналу витрата паливо-температура прямої води є доволі складним, оскільки необхідно математично описати процеси горіння та теплообмінні процеси випромінювання та конвекції. Простіше скористатися розгінними характеристиками котлів, які знімаються експериментально. Для цього ступінчасто змінюють витрату палива, що надходить в топку котла, вимірюючи при цьому температуру прямої води на виході з котла. З розгінної характеристики можна встановити сталу часу та час запізнення для конкретного котла. Так, наприклад, розгінна характеристика по каналу витрата палива – температура прямої води для котла марки Колві 4500 (потужністю 4,5 МВт), має вигляд показаний на рис. 3.

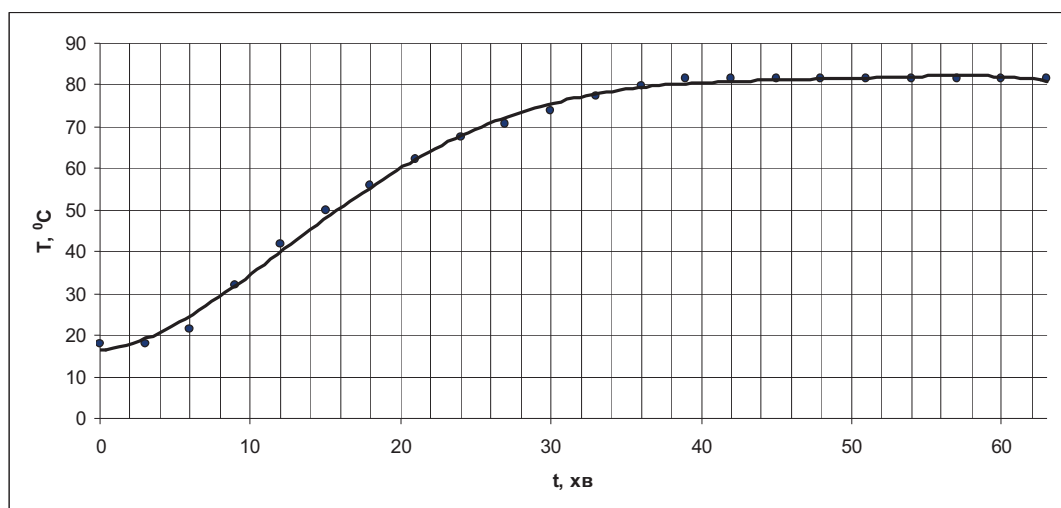


Рис. 3. Розгінна характеристика котла Колві 4500 по каналу витрата газу – температура прямої води

Як бачимо з кривої розгону, вона має аперіодичний характер з запізненням. Ця залежність описується функцією передачі:

$$W_{к.а.}(s) = \frac{K_{к.а.}}{T_{к.а.}s + 1} e^{-\tau s}, \quad (3)$$

де $K_{к.а.}$ – коефіцієнт передачі котлоагрегата, $\frac{^{\circ}C}{M^3 / год}$; $T_{к.а.}$ – стала часу котлоагрегата, хв.

Крім того, певну інерційність мають вимірювальні перетворювачі температури. Значення інерційності перетворювача наводиться в його паспортних даних. Так, для перетворювача марки ТСМ-1088 інерційність з гільзою становить не більше 120 секунд. Функція передачі цього перетворювача буде аперіодичною:

$$W_{в.н.т.}(s) = \frac{K_{в.н.т.}}{T_{в.н.т.}s + 1}, \quad (4)$$

де $K_{в.н.т.} = \frac{R_{в.н.т.}}{t}$ – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача температури, $\frac{OM}{^{\circ}C}$; $T_{в.н.т.}$ – стала часу вимірювального перетворювача температури, хв.

Вимірювання витрати рідин і газів методом змінного перепаду тисків полягає у такому. У вимірювальному трубопроводі за допомогою звужувального пристрою (ЗП) створюється звуження потоку, і частина потенціальної енергії переходить в кінетичну енергію, внаслідок чого середня швидкість потоку у місці його звуження збільшується, а статичний тиск стає меншим у місці до ЗП. Різниця тисків (перепад тиску) тим більша, чим більша витрата середовища, а отже, вона може бути мірою витрати. Масова витрата при цьому розраховується за формулою [4]:

$$q_m = \frac{\pi d^2}{4} \cdot C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}, \quad (5)$$

де d – діаметр отвору ЗП, м; C – коефіцієнт витікання; K – коефіцієнт швидкості входу; ε – коефіцієнт розширення; ρ – густина середовища, кг/м³; Δp – перепад тиску на ЗП.

Свою чергою, для газів, густина яких залежить від температури і тиску газу, необхідно враховувати коефіцієнт стисливості газу, розрахунок якого наведено в [5].

Отже, функціональна схема вимірювання витрати за методом змінного перепаду тиску матиме функціональну схему, показано на рис. 4.

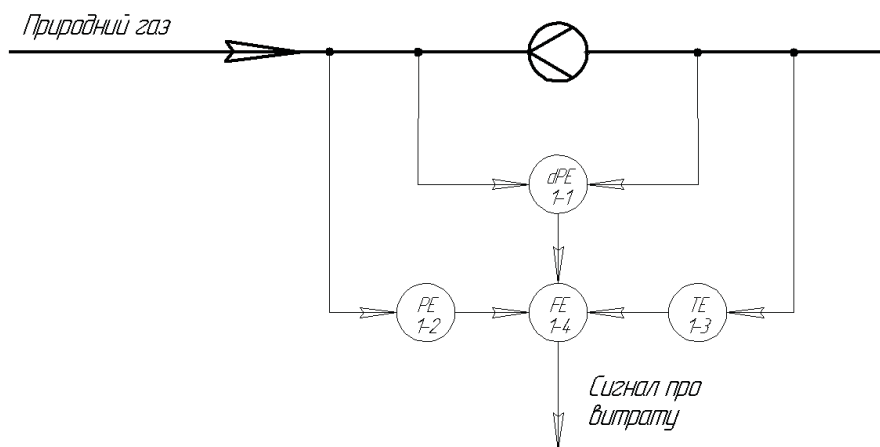


Рис. 4. Функціональна схема вимірювання витрати газу методом змінного перепаду тиску:

⊗ – звужувальний пристрій; dPE1-1 – вимірювальний перетворювач перепаду тиску (дифманометр); PE1-2 – вимірювальний перетворювач тиску газу; TE1-3 – вимірювальний перетворювач температури газу; FE1-4 – обчислювач витрати газу

Як бачимо зі схеми, інерційність у вимірювання вноситимуть: імпульсні лінії вимірювання тиску, давач перепаду тиску на ЗП, давач тиску газу, давач температури газу.

Принцип дії сучасних вимірювальних перетворювачів тиску та перепаду тиску ґрунтується на явищі п'єзоелектричності, і для них час перехідного процесу надзвичайно малий. У зв'язку з цим ним можна знехтувати, описавши ці перетворювачі пропорційною ланкою із функцією передачі:

$$W_{в.н.р.}(s) = K_{в.н.р.}, \quad (6)$$

де $K_{в.н.р.} = \frac{I_{вих}}{\Delta P_{вх}}$ – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача тиску, $\frac{мА}{Па}$; $I_{вих}$ – сила струму вимірювального перетворювача тиску, мА; $\Delta P_{вх}$ – перепад тиску на вимірювальному перетворювачі, Па.

Кожна імпульсна лінія вимірювання являє собою середовище, заповнене стиснутим газом, і за різкої зміни тиску поводитиме себе, як коливна ланка. Але при встановленні вимірювального перетворювача тиску по місцю, об'єм газу у такій лінії (трубці) буде незначним, і в цьому випадку її функцію передачі можна прийняти такою, що дорівнює одиниці.

Структурну схему системи вимірювання ККД водогрійного котла показано на рис. 5.

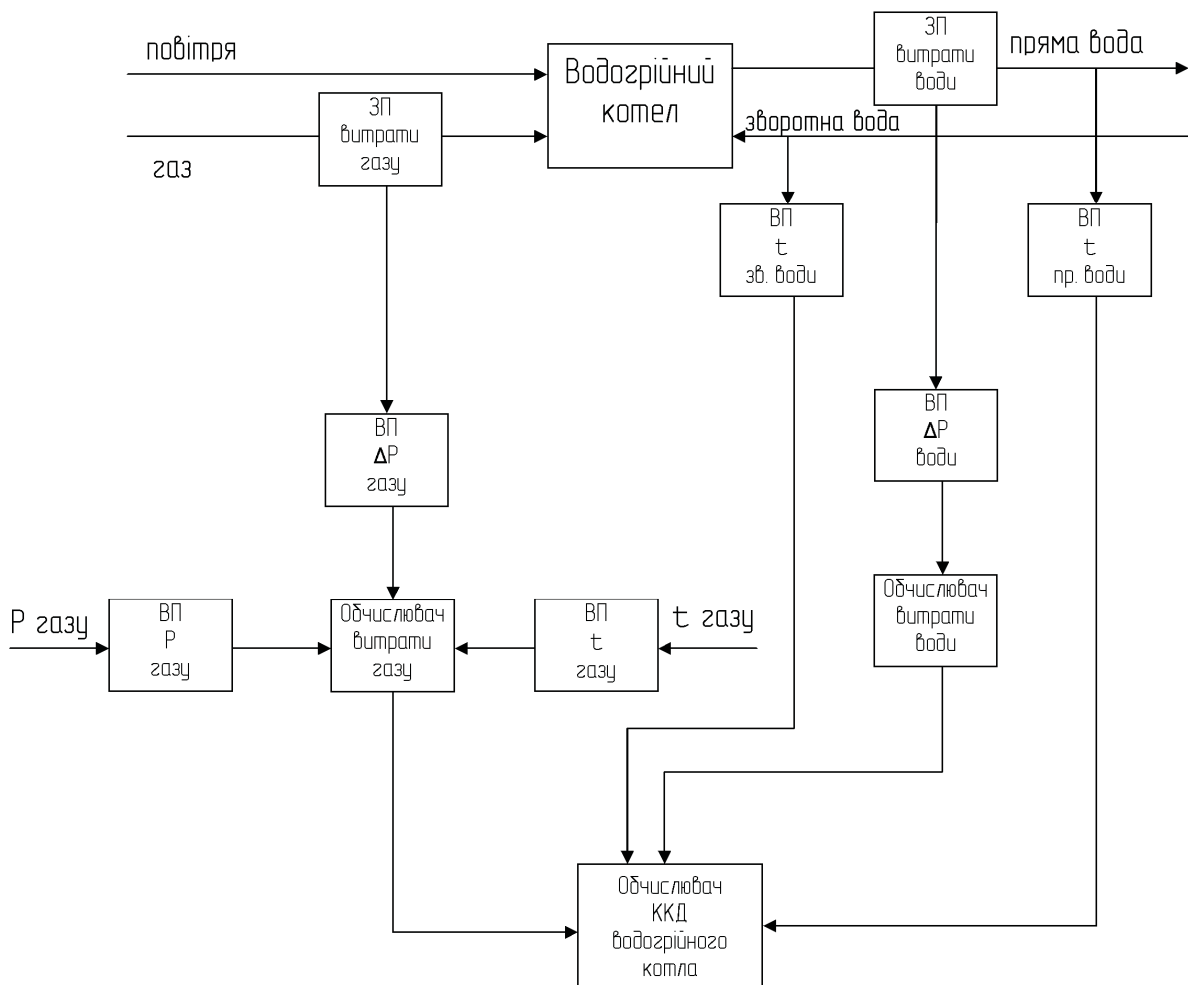


Рис. 5. Структурна схема системи вимірювання ККД водогрійного котла на газовому паливі

Як бачимо зі структурної схеми, маємо три технологічні параметри, що вимірюються перед котлом, та три технологічні параметри, що вимірюються після нього. Найбільшу інерційність в процес вимірювання вносить сам водогрійний котел. У такий спосіб для визначення ККД котлоагрегата вимірювання необхідно здійснювати після закінчення перехідних процесів. За зміни витрати газового палива (внаслідок роботи контуру регулювання температури теплоносія) необхідно ініціювати обрахунок ККД після закінчення перехідного процесу в системі на основі нових, вимірянних в усталеному режимі технологічних параметрів.

Висновки. У цій роботі запропоновано систему вимірювання ККД водогрійного котла на основі вимірювання витрати газового палива та витрати теплоносія методом змінного перепаду тиску. Дано посилання на методики розрахунку витрат рідин і газів методом змінного перепаду тиску, розрахунку теплової енергії та теплотвірної здатності природного газу. Наведено структурну схему вимірної системи та описано її ланки. Дано рекомендації щодо проведення вимірювань.

1. Сидельковский Л.Н., Юренев В.Н. Котельные установки промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 528 с. 2. ГОСТ 22667-82. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. 3. ДСТУ 1434-1:2006. Теплотічильники. Загальні вимоги. 4. ГОСТ 8.586.1-2005 (ИСО 5167-1:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. 5. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости.